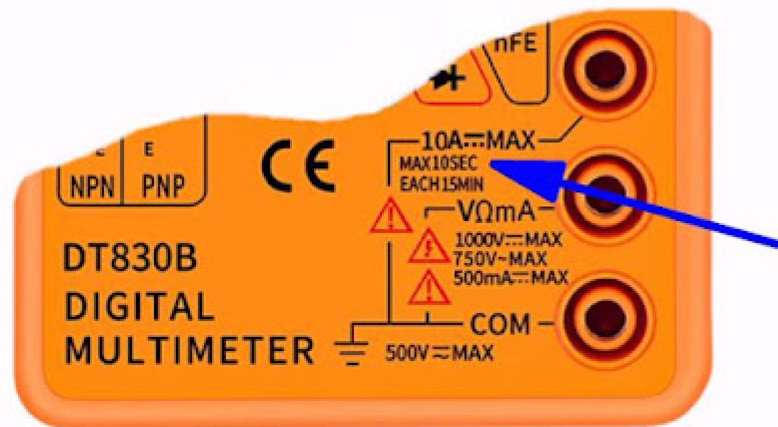
Meten van hoge stromen

Als u stromen van meer dan 10 A gedurende een lange tijd moet meten laat uw multimeter u in de steek. Dan kunt u een van de in dit artikel besproken meetmethoden gebruiken.

Auteur: Jos Verstraten, Maastricht, Nederland
Email: verstraten-1947@outlook.com
Publicatiedatum: 26-12-2025

Inleiding

Waarom gaat het niet met uw multimeter?
De meeste goedkope multimeters hebben een hoogste meetbereik voor stromen van 10 A. Echter, bij de meeste modellen kunt u slechts een zeer beperkte tijd dergelijke grote stromen meten. Vaak staat er een maximale meettijd van tien seconden op de meter vermeld. Dat heeft uiteraard alles te maken met geld. Bij goedkope meters is de stroomshunt veel te klein uitgevoerd, waardoor hij snel gaat opwarmen. Bovendien is er zo weinig ruimte in het interne van de meter dat deze warmte niet goed kan worden afgevoerd. Te lang meten van hoge stromen heeft tot gevolg dat niet alleen de stroomshunt veel te heet wordt, maar ook alle onderdelen in de buurt van deze weerstand. Niet doen, dus!



Een bekende waarschuwing op goedkope multimeters.
(© 2025 Jos Verstraten)

Praktijkvoorbeelden
Wanneer komt u, als simpele hobbyist, in aanraking met stromen die groter zijn dan 10 A? Als u bijvoorbeeld in een caravan of camper een 24 V_{dc} naar 230 V_{ac} omvormer hebt en wilt meten hoe groot de stroom nu écht is die de accu aan de omvormer moet leveren in een bepaalde praktijksituatie. Zelfs als u maar 500 W verbruikt moet u rekening houden met een accustroom die 25 A kan bedragen.
Ook in zonnepaneel-installaties en in huisaccu's krijgt u vaak te maken met stromen die ver boven de 10 A liggen.

Zes alternatieve meetmethoden
Er zijn zes methoden ontwikkeld waarmee u gedurende een lange tijd dergelijke grote stromen kunt meten. Welke voor uw doel geschikt is hangt af van het feit of u gelijkstroom of wisselstroom moet meten en of er al dan niet een absoluut galvanische scheiding moet

bestaan tussen de te meten stroom en de schakeling die deze stroom registreert. Deze methoden zijn:

- Een externe shuntweerstand gebruiken.
- Meten met een Hall-effect schakeling.
- Meten met een Rogowski spoel.
- Meten met een stroomtransformator.

De volgende twee methoden worden uitsluitend teruggevonden in zeer professionele toepassingen, maar worden voor de volledigheid in dit artikel toch in het kort besproken.

- Meten met een fluxgate stroomsensor.
- Gebruik maken van een Faraday stroomsensor.

Een externe shuntweerstand gebruiken

Toepassingsgebied

Deze methode is bruikbaar voor het meten van gelijk- en wisselstromen, maar biedt geen galvanische scheiding tussen het primaire meetcircuit en de registratie-schakeling. Het frequentiebereik is eerder beperkt door de constructie van de shunt. Een dergelijk onderdeel is immers geen zuivere weerstand, maar heeft ook een bepaalde capaciteit en zelfinductie. Zeker als de shunt draadgewonden is beperkt de zelfinductie van de wikkeling het frequentiebereik tot niet meer dan een paar kHz.

In de praktijk worden onderstaande grenzen gehanteerd:

- Draadgewonden shunt: 100 Hz ~ 1 kHz.
- Massieve laag shunt:10 kHz ~ 100 kHz.
- Speciale lage inductie shunt: 100 kHz ~ 1 MHz.

Het meetprincipe

Het meten van een hoge stroom met een externe shuntweerstand is een klassieke, nauwkeurige en veel gebruikte methode. Een shuntweerstand is een weerstand met een zeer lage maar nauwkeurig bekende waarde die in serie met de te meten stroom wordt geplaatst. Door deze stroom ontstaat er een kleine spanningsval over de shunt, die u kunt meten met uw multimeter geschakeld op het laagste spanningsbereik. De waarde van de gemeten spanning wordt uiteraard gegeven door de wet van Ohm:

$U_{shunt} = I \cdot R_{shunt}$

De waarde van de gemeten stroom is dus:

$I = U_{shunt} / R_{shunt}$

De ingangsweerstand van uw multimeter, parallel geschakeld aan R_{shunt}, is zo groot dat u de invloed daarvan op de meting volledig kunt verwaarlozen.

De metaallegeringen

De gebruikte metaallegeringen moeten:

- Een zeer stabiele soortelijke weerstand hebben.
- Een minimale temperatuurscoëfficiënt hebben.
- Een uitstekende lange termijn stabiliteit hebben.
- Zeer hoge stromen kunnen verwerken.

Er worden in de praktijk slechts drie legeringen toegepast:

- **Manganine**
  Is samengesteld uit 84 tot 86 % koper (Cu), 12 tot 13 % mangaan (Mn) en 2 tot 4 % nikkel (Ni). Het werd voor het eerst ontwikkeld door Edward Weston. Deze legering heeft een zeer lage temperatuurscoëfficiënt van slechts 10 ppm/°C. De soortelijke weerstand bedraagt $0{,}43 \cdot 10^{-6}$ tot $0{,}48 \cdot 10^{-6}$ Ωm. Manganine wordt toegepast in de shuntweerstanden van de betere kwaliteit.
- **Constantaan**
  Is samengesteld uit 54 % koper (Cu), 45 % nikkel (Ni) en 1 % mangaan (Mn). Ook deze legering werd ontwikkeld door Edward Weston. Deze legering heeft een tamelijk stabiele temperatuurscoëfficiënt van 30 tot 50 ppm/°C. Het heeft een iets hogere soortelijke

weerstand dan manganine, 0,49 • 10^{-6} Ωm. Het wordt toegepast in de goedkoopste shuntweerstanden.

- **Zeranine**
  Dit is ook een op een menging van koper-mangaan-nikkel gebaseerde legering, waarvan de precieze mengverhouding door iedere fabrikant van shunts wordt geoptimaliseerd en geheim wordt gehouden. Dit materiaal wordt gebruikt voor zeer nauwkeurige shunts.

Uitvoering van externe shuntweerstanden

Er zijn ontelbaar veel uitvoeringen van externe shuntweerstanden in de handel. De grootte en de vorm zijn voornamelijk afhankelijk van de maximale stroom die de shunts moeten verwerken en het gewenste frequentiebereik. In de onderstaande afbeelding ziet u er een aantal van.



Uitvoeringsvormen van externe shunts. (© 2025 Jos Verstraten)

De parameters van een stroomshunt

Externe stroomshunts worden door twee parameters gedefinieerd:

- De maximale stroom.
- De spanningsval bij deze maximale stroom.

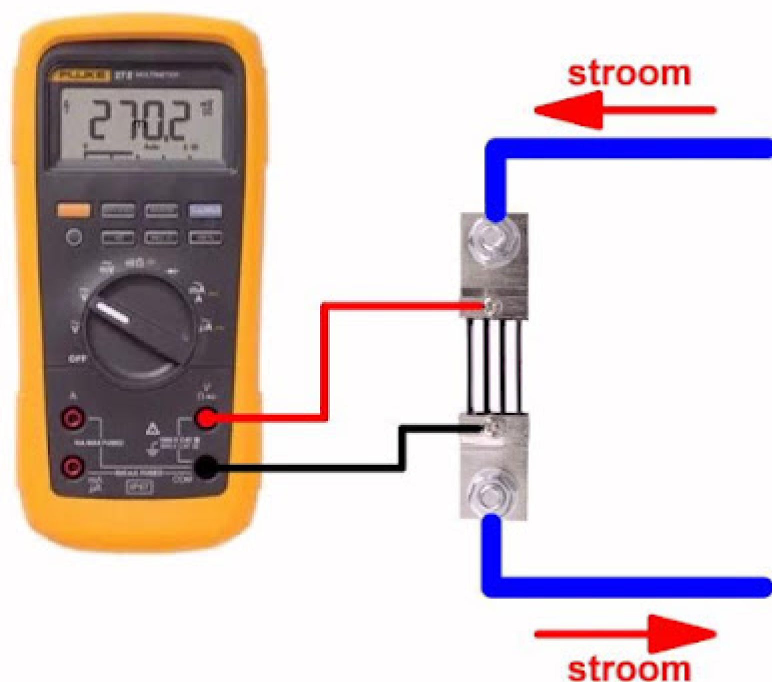
Een typische shunt is bijvoorbeeld 100 A/75 mV. Uit deze twee gegevens kunt u uiteraard, aan de hand van de wet van ohm, de weerstand van de shunt afleiden.
U kunt shunts kopen tot een maximale stroom van diverse kA's, maar die zult u in uw hobby-shack niet vaak nodig hebben. Vreemd genoeg leveren de meeste shunts een spanning van 75 mV bij de maximale stroom. Dat heeft uitsluitend historische redenen. De 75 mV shunt is ontstaan in de tijd van analoge paneelmeters. Veel stroommeters werden ontworpen met draaispoel spanningsmeters met een volle-schaal gevoeligheid van 100 mV. Een spanning van 75 mV laat dan de meternaald tot 75 % van de volle schaal uitslaan, wat ruimte biedt om ook kort durende grotere inschakelstromen te meten zonder dat de naald in de hoek slaat. In de moderne tijd met digitale voltmeters zou het natuurlijk handiger zijn als een stroomshunt van 100 A een spanning van 100 mV zou genereren bij deze stroom. Bij 75 mV moet u immers altijd de gemeten spanning even omrekenen naar de corresponderende stroom.
Voorbeeld:
Stel een shuntweerstand met als specificatie 100 A/75 mV.
100 A levert 75 mV.
1 mV komt dus overeen met 100 A / 75 mV = 1,333 A/mV
Leest u bij een meting 25,3 mV af, dan vloeit er een stroom van:
I_{shunt} = 25,3 mV • 1,333 A/mV = 33,73 A
Behalve de stroomshunts die 75 mV genereren zijn er tegenwoordig echter ook exemplaren die 50 mV of 100 mV leveren bij de gespecificeerde maximale stroom.

Vermogensverlies en opwarming

Hoewel de weerstand van een stroomshunt extreem laag is kan er in de praktijk toch wel heel wat vermogen in gedissipeerd worden. Neem als voorbeeld weer die shunt 100 A/75 mV.
Uit de wet van ohm volgt dat deze een weerstand heeft van slechts 0,75 mΩ.
Verwaarloosbaar, lijkt het! Maar als daar 100 A door loopt wordt er een vermogen gedissipeerd dat gegeven wordt door:
$P = I^2 \cdot R$
$P = 100 \cdot 100 \cdot 0{,}00075$
$P = 7{,}5$ W

Een niet te verwaarlozen vermogen in één onderdeel! De shunt zal dus flink opwarmen, wat gevolgen kan hebben voor de nauwkeurigheid van de meting en de lange-termijn kwaliteit van de shunt.
Bij manganine, zoals geschreven een vaak toegepast materiaal voor shunts, treedt al bij 80 °C thermische drift op. Bij 120 °C wordt de thermische drift een groot probleem waarbij de meetfout kan stijgen tot enkele procenten. Bij 140 °C raakt de manganine-legering beschadigd door gloeien, waardoor de weerstandswaarde ook na afkoeling een afwijking gaat vertonen. Hierdoor wordt de nauwkeurigheid van alle metingen uiteraard aangetast.
Bij het toepassen van externe shunts moet u er dus op letten dat u een exemplaar uitkiest dat zo veel volume heeft dat de temperatuur nooit boven 80 °C kan stijgen.

Het aansluiten van een stroomshunt
Zoals uit de bovenstaande foto blijkt, hebben alle externe stroomshunts vier aansluitingen. Opnemen van een externe stroomshunt in een meetopstelling gaat dus met behulp van de Kelvin-methode. Twee dikke aansluitingen voeren de te meten stroom aan en af. Twee dunne aansluitingen voeren de spanningsval over de shunt naar uw digitale multimeter.

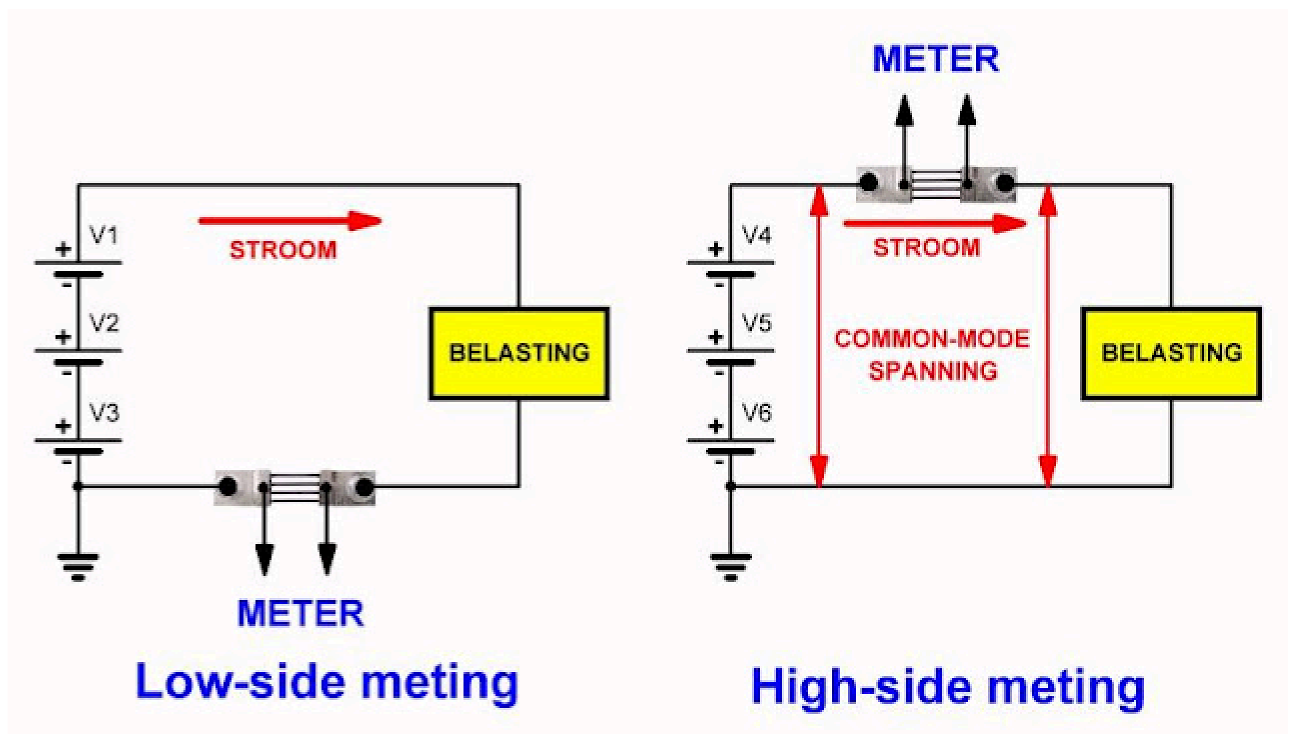


Aansluiten van een stroomshunt volgens de Kelvin-methode.
(© 2025 Jos Verstraten)

Low-side of high-side
Als de voedingsbron van het systeem is geaard of aan de massa hangt (caravans en campers!) kunt u kiezen voor het opnemen van de stroomshunt volgens:
- De low-side methode.
- De high-side methode.

Beide systemen zijn getekend in de onderstaande figuur.

- Bij de low-side meting hangt één kant van de shunt aan de massa of aarde, met als groot voordeel dat de beide aansluitpunten van het meetsysteem ook op ongeveer massa-potentiaal staan en dus geen gevaarlijke spanning voeren. Nadeel is wel dat eventuele lekstromen, die vanuit de voeding wegvloeien naar de massa, niet mee worden gemeten.
- Het high-side systeem heeft dit nadeel niet, omdat de shunt rechtstreeks aan de positieve aansluiting van de voeding hangt en dus alle geleverde stromen worden gemeten. Nadeel is dat nu beide aansluitpunten van het meetsysteem op een common-mode spanning staan. Dat kan gevaarlijk zijn, bijvoorbeeld als u op een dergelijke manier de stroomlevering van een stel zonnepanelen wilt controleren. Dan kan de common-mode spanning diverse honderden volt bedragen ten opzichte van de aarde.

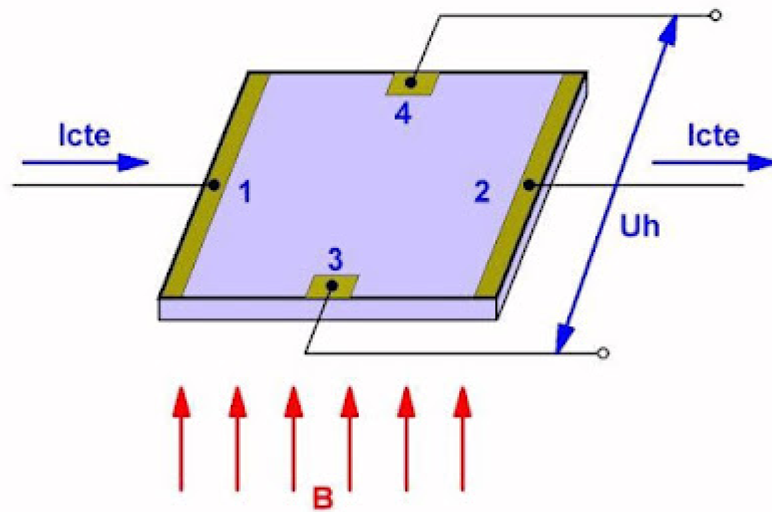


Een low-side en een high-side meetopstelling. (© 2025 Jos Verstraten)

Meten met een Hall-effect schakeling

Toepassingsgebied
Een Hall-effect stroomsensor meet elektrische stroom door het magnetische veld te detecteren dat door die stroom wordt opgewekt. De meting is galvanisch gescheiden, kan gelijk- én wisselstroom omvatten en is geschikt voor zeer grote stromen. Het frequentiebereik gaat tot honderden kHz.

Fysische werking
Een Hall-sensor is een onderdeel dat een gelijkspanning genereert waarvan de grootte afhankelijk is van de sterkte van de magnetische veldsterkte die op het onderdeel invalt.
De principiële opbouw van een Hall-generator is getekend in de onderstaande figuur. Uit een halfgeleider, in de meeste gevallen een verbinding met indium, wordt een dunne folie gemaakt. Aan twee tegenover elkaar liggende zijden worden brede contactstrippen 1 en 2 aangebracht. Aan de twee overige zijden worden kleine contactpunten 3 en 4 gemonteerd. De strippen 1 en 2 worden opgenomen in een schakeling die een constante stroom I_{cte} door de folie stuurt. Deze stroom I_{cte} heeft tot gevolg dat er in de halfgeleidende folie elektronen van 1 naar 2 gaan migreren.
Zonder extern magnetisch veld volgen deze elektronen de kortste weg door de folie en is het plaatje elektrisch in evenwicht.



Het principe van een Hall-sensor. (© 2025 Jos Verstraten)

Brengt u echter een magnetisch veld B loodrecht op het plaatje aan, dan zullen de elektronen als gevolg van de Lorentzkracht worden afgebogen op hun weg tussen de strippen 1 en 2. Afhankelijk van de richting van het magnetisch veld zullen de elektronen of naar contactpunt 3 of naar contactpunt 4 worden afgebogen. Het gevolg is dat er over het plaatje een elektrisch veld ontstaat, dat tussen de punten 3 en 4 een kleine gelijkspanning Uh opwekt. Deze spanning U_h noemt men de '*Hall-spanning*' en de grootte van deze spanning is evenredig met de sterkte van het elektrische veld in de halfgeleidende folie. Omdat dit veld op haar beurt weer afhankelijk is van de sterkte van het magnetisch veld kunt u concluderen dat de grootte van de Hall-spanning recht evenredig is met de grootte van de loodrecht op het plaatje invallende magnetische veldsterkte B.

Contactloos meten van stromen met een Hall-sensor

De te meten stroom I_1 wordt, zie de onderstaande figuur, door een paar windingen gestuurd rond een magnetische kern met luchtspleet. In de luchtspleet plaatst u een Hall-sensor. De uitgangsspanning van dit IC stuurt via een verschilversterker een stroom I_2 door een tweede wikkeling. De verschilversterker vergelijkt de uitgangsspanning van de sensor met de massa, het systeem zal dus streven naar een Hall-spanning gelijk aan 0 V. Op dat moment is de magnetische veldsterkte in de kern gelijk aan nul, hetgeen alleen mogelijk is als de veldsterkte die door de stroom I_1 in de kern wordt gegenereerd precies gelijk is aan de (tegengestelde) veldsterkte die door de stroom I_2 wordt opgewekt.

Nu een beetje niet ingewikkelde wiskunde:

$I_1 \bullet n_1 = I_2 \bullet n_2$

$I_2 = I_1 \bullet [n_1 / n_2]$

$U_{uit} = R1 \bullet I_2$

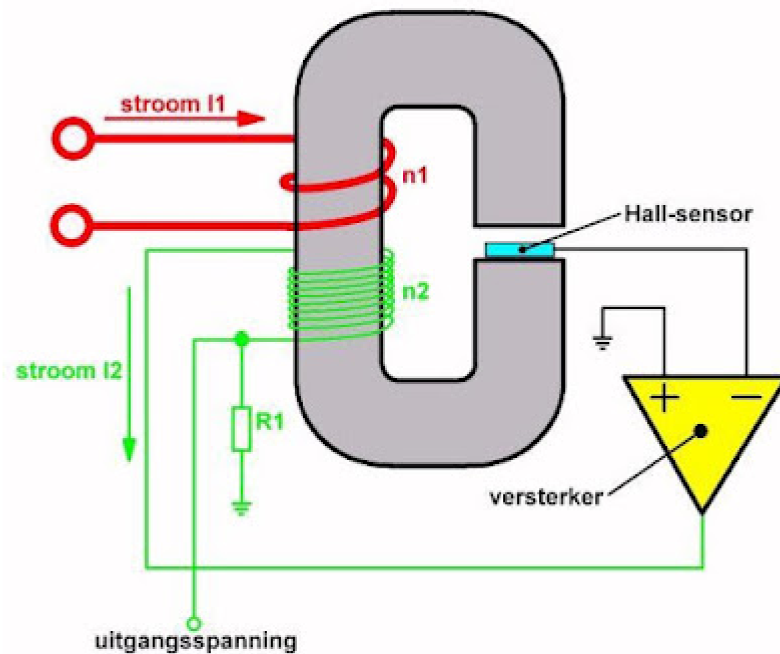
$U_{uit} = R1 \bullet I_1 \bullet [n_1 / n_2]$

Stel de constante factor $R1 \bullet [n_1 / n_2] = \alpha$.

Dan wordt:

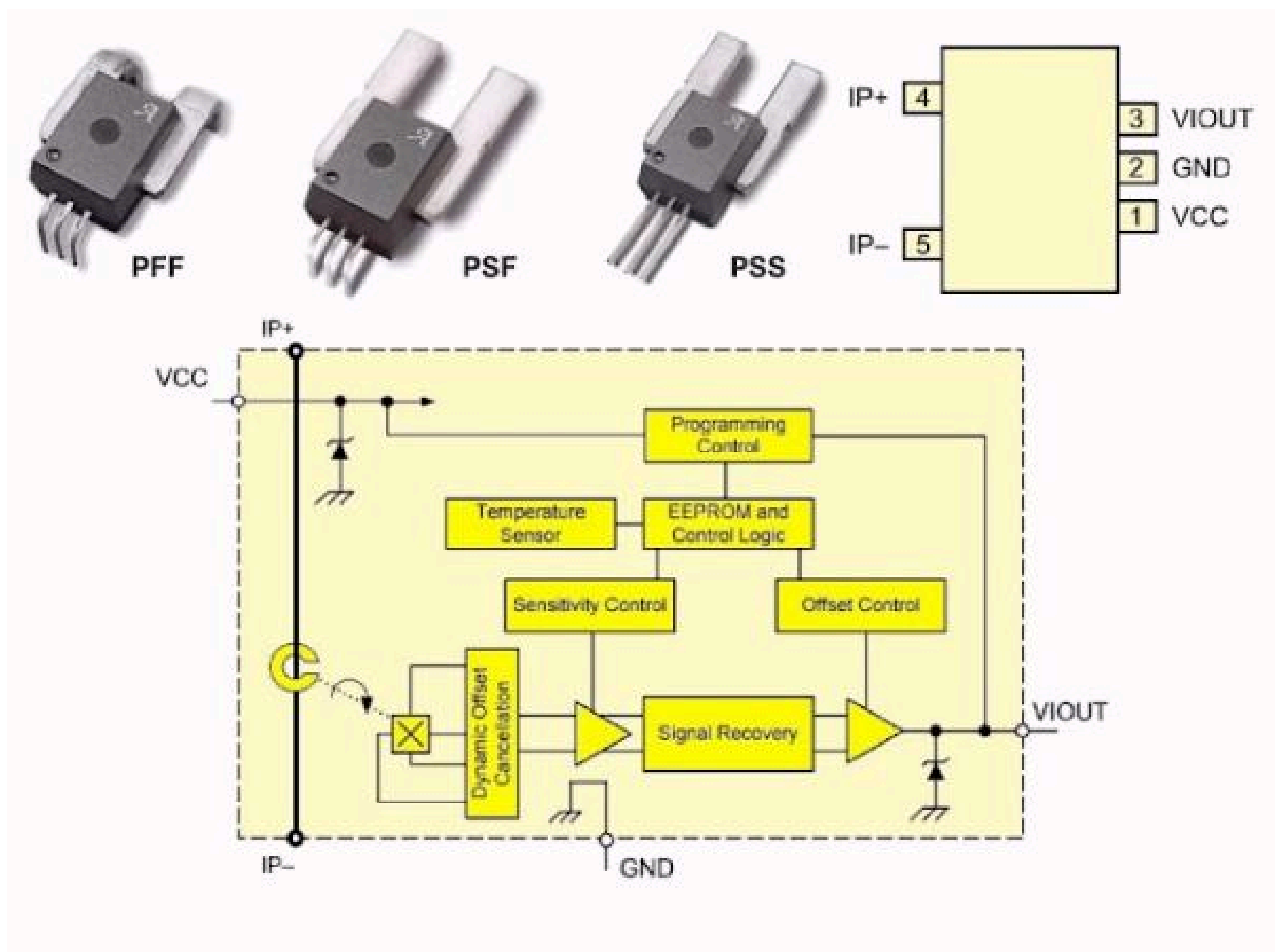
$U_{uit} = \alpha \bullet I_1$

De uitgangsspanning U_{uit} is recht evenredig met de grootte van de te meten stroom I_1.



Galvanisch gescheiden meten van een hoge gelijkstroom.
(© 2025 Jos Verstraten)

De ACS770: een kant-en-klare oplossing
Het zélf in elkaar knutselen van het in de vorige figuur voorgesteld systeem is uiteraard niet zo eenvoudig. Gelukkig bestaan er diverse kant-en-klare oplossingen waar het volledige meetsysteem in één IC is geïntegreerd. Een typisch voorbeeld is de ACS770 van Allegro, voorgesteld in de onderstaande figuur.
De primaire kant van het IC bestaat uit twee flinke contacten die intern zijn verbonden met een koperen geleidingsplaatje. Geïsoleerd op dit koperen plaatje is de Hall-sensor aangebracht. Deze meet de sterkte van het magnetisch veld dat de stroom rond het koperen plaatje opwekt. De lage spanning van de Hall-sensor wordt door middel van een chopperversterker versterkt tot een meetbare uitgangsspanning. In dit IC is een uitgebreid door Allegro gepatenteerd digitaal schakelsysteem ingebouwd om de offset van de interne analoge schakelingen te compenseren.
Het koperen plaatje heeft een weerstand van slechts 100 µΩ, zodat het primaire stroomcircuit nauwelijks wordt beïnvloed door het IC.

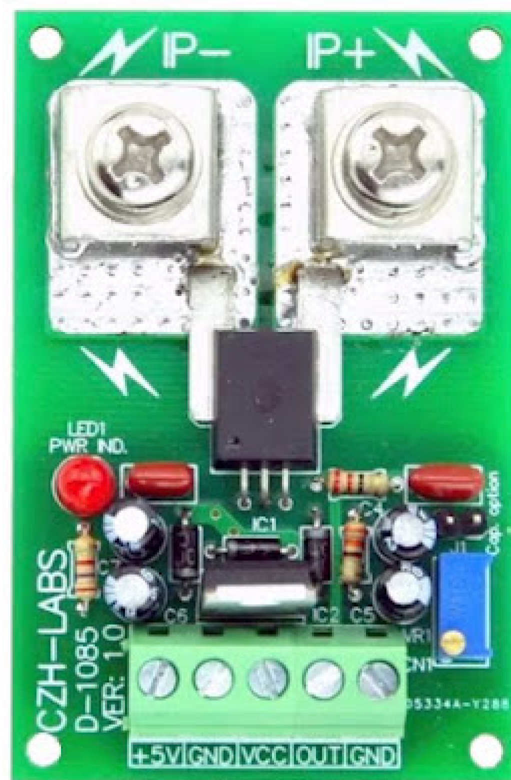


Uiterlijk, blokschema en aansluitgegevens van de ACS770. (© 2025 Jos Verstraten)

De technische gegevens van de ACS770 samengevat:

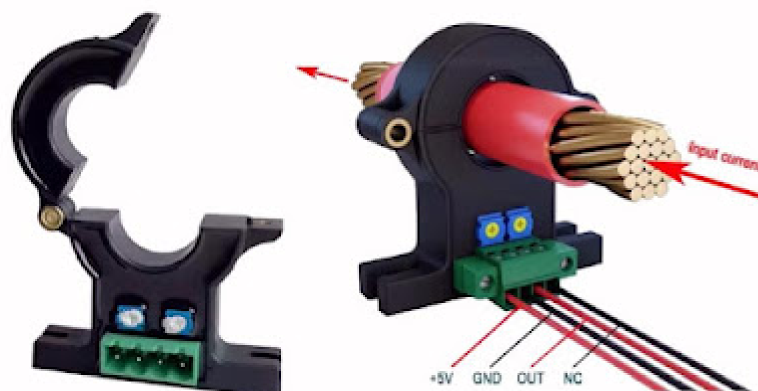
- Fabrikant: Allegro Microsystems
- Richtprijs: € 9,50 per stuk
- Voedingsspanning: +4,5 V ~ +5,5 V
- Voedingsstroom: 15 mA max.
- Meetbereik: ±50 A_{dc}, 50 A_{ac}
- Uitgangsspanning in rust: +2,425 V ~ +2,575 V
- Gevoeligheid: 40 mV/A typisch
- Frequentiebereik: 120 kHz typisch
- Responstijd: 4,6 µs typisch
- Lineariteitsfout: ±1 % typisch
- Nauwkeurigheid: ±0,6 % typisch
- Resistieve uitgangsbelasting: 4,7 kΩ min.
- Capacitieve uitgangsbelasting: 10 nF max.
- Primaire weerstand: 100 µΩ typisch

Diverse fabrikanten hebben kant-en-klare printjes ontwikkeld met de ACS770 als basis. In de onderstaande foto ziet u zo'n printje ontwikkeld door het Chinese CZH-Labs en dat te koop is voor ongeveer € 25,00.



Een compleet printje met een ACS770 als basis.
(© CZH-Labs)

De QNHCK1-21 Hall-sensor
Een andere op een hall-sensor gebaseerde stroomsensor is de QNHCK1-21 van het (alweer) Chinese NJQNET. Deze in de onderstaande figuur voorgestelde stroomsensor kunt u openklappen, zodat u er een dikke, stroomvoerende geleider in kunt aanbrengen. Deze sensor wordt via AliExpress aangeboden voor ongeveer € 16,50 en is leverbaar voor maximale stromen van 20 A tot 500 A. De maximale uitgangsspanning bedraagt 2,2 V_{dc}. De QNHCK1-21 meet posieve en negatieve gelijkstromen, maar ook wisselstromen tot 10 kHz.



De QNHCK1-21 Hall-stroomsensor van NJQNET. (© NJQNET)

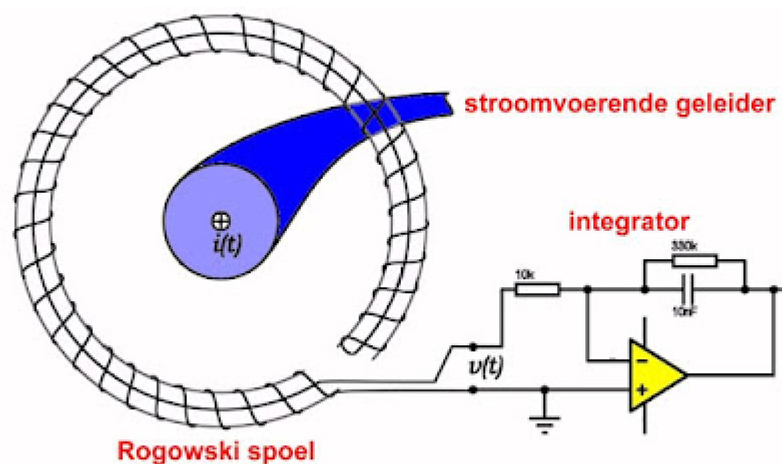
Meten met een Rogowski spoel

Toepassingsgebied
Een Rogowski spoel, vernoemd naar de Duitser Walter Rogowski, is een contactloze stroomsensor die wordt gebruikt om grote wisselstromen te meten, van tientallen ampères tot vele kiloampères. Zo'n spoel is flexibel, is eenvoudig te plaatsen zonder de kring te onderbreken en meet de stroom tot signaalfrequenties in het MHz gebied. Uit de aard van het principe bestaat er een galvanisch gescheiden tussen de meting en de schakeling die de meetwaarde verwerkt.

Rogowski-spoelen hebben geen kern en raken dus niet verzadigd, waardoor ze zeer hoge stromen met een zeer grote lineariteit en nauwkeurigheid kunnen meten.

Werkingsprincipe

Een Rogowski spoel is een luchtspoel en bevat dus geen ijzeren kern. De spoel wordt onder de vorm van een flexibele ring om een stroomvoerende geleider geplaatst. Voor het gemakkelijk aanbrengen van de spoel rond de geleider wordt een van de uiteinden door het midden van de spoel teruggeleid naar het begin, zodat beide draden op dezelfde plaats uit de spoel komen.
De werking is gebaseerd op de wet van Faraday. Een wisselstroom in een geleider veroorzaakt een tijdsafhankelijk magnetisch veld rondom de geleider. Dit veranderende magnetisch veld doorloopt de windingen van de Rogowski spoel en wekt daarin een wisselspanning op. De grootte van die wisselspanning is afhankelijk van het aantal windingen van de spoel en van de grootte van de magnetische flux.
Wiskundig kan worden aangetoond dat de uitgangsspanning van een Rogowski spoel niet evenredig is met de stroom zélf, maar met de tijdsafgeleide di(t)/dt van de stroom. Vandaar dat u het uitgangssignaal van de spoel eerst moet integreren.
In de onderstaande figuur is de principiële samenstelling van een Rogowski spoel voorgesteld, samen met de absoluut noodzakelijke integrator-schakeling.



De principiële samenstelling van een Rogowski spoel.
(© 2011 Luque Alfredo via Wikimedia Commons)

Superieure frequentierespons

De lage inductantie van een Rogowski spoel zorgt ervoor dat deze een snelle frequentierespons heeft en zich binnen een fractie van een seconde kan aanpassen aan snel veranderende elektrische belastingen. Ze bieden superieure prestaties in toepassingen voor stroombewaking in schakelingen met hoge, snel veranderende stromen.

Het aanbrengen van een Rogowski spoel

In de onderstaande illustratie ziet u hoe zo'n spoel er in de praktijk uitziet en hoe u het onderdeel rond een stroomvoerende geleider kunt aanbrengen.



Het aanbrengen van een Rogowski spoel. (© Janitza)

Een praktijk voorbeeld
In de onderstaande figuur ziet u een Rogowski spoel van het type NRC-83 van Meatrol. Dat is een merknaam van het Chinese bedrijf Shanghai Pinyan M&C Technology Co., Ltd. Deze kost ongeveer € 18,00 en levert 120 mV voor 1 kA stroom.



De NRC-83 van Meatrol. (© Meatrol)

De Micsig RCP300 AC current probe
Miniatuur Rogowski spoelen worden ook gebruikt om snel variërende stromen zichtbaar te maken op een oscilloscoop. Als voorbeeld bespreken wij de RCP300 van het Chinese Micsig. Deze oscilloscoop probe heeft een Rogowski spoel aan de ingang met een diameter van slechts 25 mm. De dikte van de spoel bedraagt 1,6 mm, zodat u deze spoel zonder problemen kunt aanbrengen tussen de aansluitingen van een TO-220 halfgeleider. Met een meetbereik tot 300 A en een bandbreedte van 10 Hz tot 30 MHz is deze probe ideaal voor het dynamisch testen en het observeren van het schakelgedrag van MOSFET's en IGBT's. Deze stroomprobe levert een uitgangsspanning van 20 mV/A met een faseverschil van minder dan 0,8°.



De Micsig RCP300 AC current probe. (© Micsig)

Meten met een stroomtransformator

Toepassingsgebied
Een stroomtransformator, vaak afgekort tot CT van het Engelse '***C****urrent* ***T****ransformer*', is een passief onderdeel dat een grote wisselstroom in een primaire geleider omzet in een kleine, nauwkeurig proportionele wisselstroom aan de secundaire zijde. Een CT is dus uitsluitend bruikbaar in een wisselspanningsomgeving, maar werkt wel met galvanische scheiding.

Werkingsprincipe
Een stroomtransformator bevat identieke onderdelen als de welbekende spanningstransformator: primaire wikkeling, magnetiseerbare kern en secundaire wikkeling. Maar daarmee houdt de gelijkenis op! Een CT werkt heel andere dan een spanningstrafo en u moet flink anders gaan denken:

- De primaire wikkeling bevat hoogtens een paar windingen van heel dikke draad. Vaak bestaat de primaire uit slechts één winding.
- Deze wikkeling heeft dus een zeer lage weerstand waarover zeer weinig spanning valt.
- De kern is gemaakt van een ferromagnetisch materiaal met hoge permeabiliteit.
- De secundaire wikkeling bestaat uit heel veel windingen van dunne wikkeldraad.
- Die secundaire wikkeling **MOET** worden afgesloten met een zo laag mogelijke weerstand. Men spreekt zelfs van een '*quasi kortsluiting*'.
- Zowel primair als secundair is er dus slechts zeer kleine spanning aanwezig over de wikkelingen.

De primaire stroom I_{prim} wekt een magnetische flux Φ_{prim} op in de kern. Deze flux induceert in de secundaire wikkeling een spanning die de secundaire stroom I_{sec} tot gevolg heeft. Deze stroom genereert de secundaire flux Φ_{sec}, die tegengesteld is aan de primaire flux Φ_{prim}. De resterende flux in de kern is dus klein, met als gevolg dat er geen risico bestaat dat de kern verzadigd geraakt. Een stroomtransformator werkt dus altijd in het lineaire deel van de BH-karakteristiek.

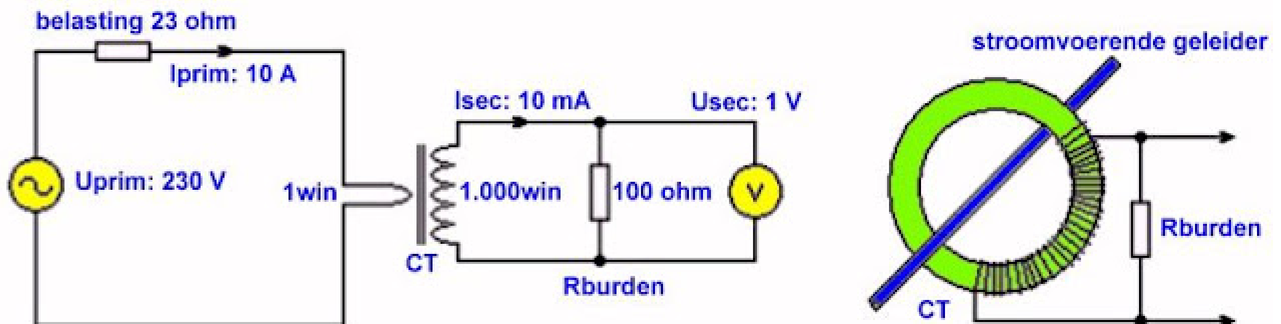
Verband tussen primaire stroom en secundaire spanning
De verhouding tussen de primaire en secundaire stromen is omgekeerd evenredig met de wikkelverhouding van de twee wikkelingen:
$I_{prim} / I_{sec} = N_{sec} / N_{prim}$
Hieruit volgt:
$I_{sec} = I_{prim} \bullet [N_{prim} / N_{sec}]$
Als de secundaire wikkeling belast wordt met een weerstand R_{sec}, dan is de secundaire spanning gelijk aan:
$U_{sec} = I_{sec} \bullet R_{sec}$
Beide formules gecombineerd levert:
$U_{sec} = I_{prim} \bullet [N_{prim} / N_{sec}] \bullet R_{sec}$
N_{prim}, N_{sec} en R_{sec} zijn constant:
$U_{sec} = I_{prim} \bullet cte$
De secundaire spanning is dus recht evenredig met de primaire stroom. Op deze manier kunt u, door de secundaire spanning te meten, te weten komen hoeveel stroom er primair vloeit.

Burden weerstand
De noodzakelijke secundaire belasting wordt de '*burden weerstand*' genoemd.

Wat gebeurt er bij open secundaire?
Als u de secundaire burden weerstand zou verwijderen wordt de secundaire stroom nul. Dan wordt ook de secundaire flux nul. De hoge primaire flux wordt dan niet meer tegengewerkt en vloeit ongehinderd door de kern. Deze grote flux wekt in de vele windingen van de secundaire wikkeling een zeer hoge spanning op. Deze spanning kan zo hoog worden dat er doorslag ontstaat en de stroomtransformator defect geraakt.
CONCLUSIE: ***U mag een stroomtransformator nooit gebruiken met open secundaire wikkeling, altijd een zeer lage burden weerstand aansluiten of kortsluiten.***

Gewend als u bent aan het denken aan spanningstransformatoren mag u bij het werken met stroomtransformatoren het onderstaande nooit vergeten: wat bij een spanningstransformator normaal is, is bij een stroomtransformator gevaarlijk en omgekeerd.

Voorstelling van een stroomtransformator CT
In de praktijk bestaat in de meeste gevallen de primaire wikkeling niet echt, maar gebruikt men de stroomvoerende geleider als dusdanig. Theoretisch kan dat worden beschouwd als een wikkeling met één winding. De secundaire wikkeling is dan op een ringvormige kern gewikkeld en sluit zich rond de stroomvoerende geleider. In de onderstaande figuur is dat schematisch en praktisch voorgesteld voor een 1/1.000 stroomtransformator.



Voorstelling van de stroomtransformator. (© Talema, edit 2025 Jos Verstraten)

Stroomtrafo versus Rogowski spoel
Deze twee systemen voor het meten van hoge stromen lijken op elkaar: iets ringvormig rond de stroomvoerende geleider. Maar als u de werking van beide systemen goed hebt begrepen zult u het met ons eens zijn dat die gelijkenis uitsluitend oppervlakkig is. Beide onderdelen werken volledig anders.

Praktische uitvoeringsvormen
Er zijn ontelbaar veel uitvoeringen van CT's ontwikkeld, voor stromen van een paar tiental ampère tot stromen van tientallen kA's. De kleinste modellen kunt u ook als printmodel aanschaffen. Bij sommige uitvoeringen is de kern onderbroken en kunt u de ring openklappen, zodat u de CT gemakkelijk rond de stroomvoerende geleider kunt aanbrengen. Dergelijke uitvoeringen noemt men '*split-core CT's*'. In de onderstaande figuur hebben wij een aantal uitvoeringen van CT's verzameld.



Praktische uitvoeringen van CT's. (© 2025 Jos Verstraten)

Bar-type CT's
Bij stroomtransformatoren die heel erg hoge stromen kunnen meten is de primaire wikkeling uitgevoerd als een staaf, die vast in de CT is ingegoten. Dergelijke uitvoeringen noemt men '*bar-type CT's*' en zijn voorgesteld in de onderstaande figuur.



Uitvoeringen van bar-type CT's. (© 2025 Jos Verstraten)

De nauwkeurigheidsklassen van CT's
De nauwkeurigheidsklasse geeft aan hoe groot de meetfout van een CT mag zijn binnen een gespecificeerd stroomgebied en bij een bepaalde secundaire belasting. Deze specificatie is genormeerd door IEC 61869 en IEC 60044 en bevat vijf klassen:
- Klasse 0.1: maximale fout ±0,1 %, maximale fasefout ±5 min
- Klasse 0.2: maximale fout ±0,2 %, maximale fasefout ±10 min
- Klasse 0.5: maximale fout ±0,5 %, maximale fasefout ±30 min
- Klasse 1: maximale fout ±1 %, maximale asefout ±60 min
- Klasse 3: maximale fout ±3 %, maximale fasefout niet gespecificeerd

Deze fouten mogen optreden tussen 5 % en 120 % van de nominale primaire stroom en bij de nominale belasting.

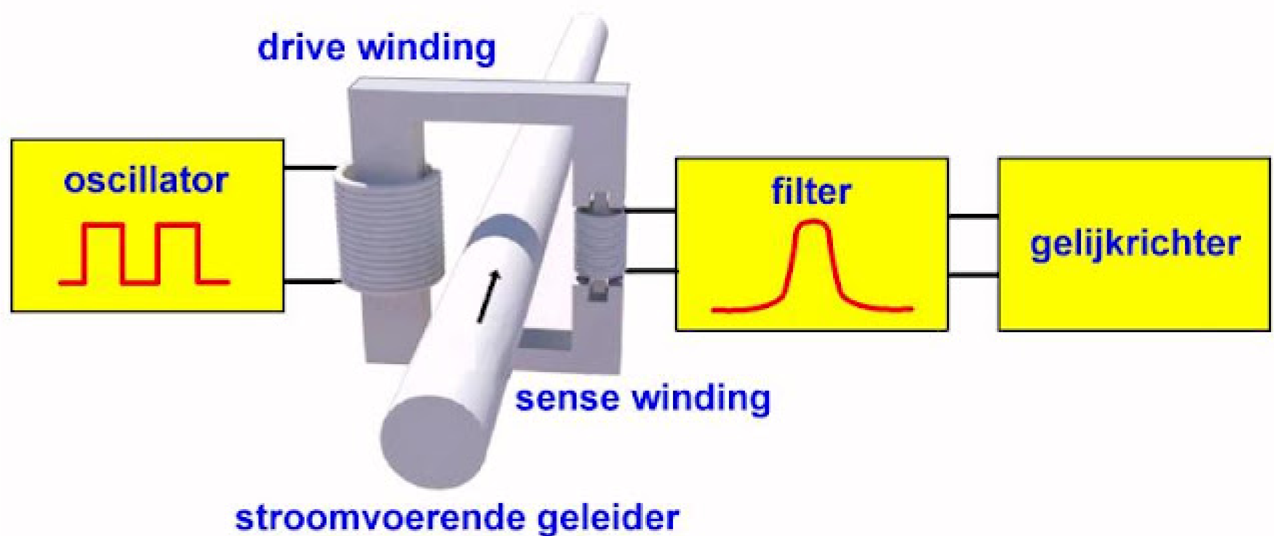
Meten met een fluxgate stroomsensor

Toepassingsgebied
Een fluxgate stroomsensor is een uiterst nauwkeurige sensor voor het meten van gelijk- en wisselstroom zonder direct elektrisch contact. Er bestaat dus een volledig galvanische scheiding. Het systeem werkt tot enkele honderden kHz.

Het werkingsprincipe
De werking is gebaseerd op het magnetische verzadigingsprincipe van een kern met hoge permeabiliteit. Een fluxgate sensor bestaat uit een ringvormige kern, waarop twee wikkelingen aanwezig zijn. De kern is aangebracht rond de stroomvoerende geleider. De eerste spoel noemt men de excitatiespoel of '*drive winding*'. De kern van deze spoel wordt periodiek in en uit magnetische verzadiging gedreven door de excitatiestroom die door deze spoel wordt gestuurd. Deze spoel wordt dus gevoed door een wisselspanning met een bepaalde frequentie. De tweede spoel heet de sensorspoel of '*sense winding*' en zal een spanning genereren als gevolg van het vloeien van de excitatiestroom door de eerste spoel.
Er zijn nu twee situaties denkbaar:

- Er vloeit geen stroom door de stroomvoerende geleider:
  De kern wordt symmetrisch gemagnetiseerd door de excitatiestroom en de magnetisatie van de kern volgt de symmetrische BH-curve. De in de sensorspoel geïnduceerde spanning bevat alleen oneven harmonischen van de frequentie van de excitatiestroom.
- Er vloeit wél stroom door de stroomvoerende geleider:
  Het extra magnetisch veld van deze stroom verschuift het werkpunt van de kern. De verzadiging van de kern wordt asymmetrisch en daardoor ontstaat er een meetbare tweede harmonische in de geïnduceerde spanning in de sensorspoel. Men kan wiskundig aantonen dat de amplitude van deze tweede harmonische recht evenredig is met de primaire stroom.

Het komt er dus op aan de sense winding af te sluiten met een scherp banddoorlaat filter dat is afgestemd op de tweede harmonische van de frequentie van de excitatiespanning. Nadien volgt een gelijkrichter en meetschakeling die de grootte van de tweede harmonische weergeeft.



Het werkingsprincipe van een fluxgate stroomsensor. (© 2025 Jos Verstraten)

Eigenschappen en toepassingen
De voornaamste eigenschap van een fluxgate stroomsensor is zijn hoge precisie. Het systeem kan een nauwkeurigheid bereiken van 10 ppm (parts per million). Vanwege deze hoge nauwkeurigheid worden fluxgate stroomsensoren veel gebruikt in veeleisende omgevingen, zoals in MRI-scanners voor het genereren van uiterst stabiele en zeer sterke magneetvelden.

De DTxxxID van DaniSense als voorbeeld
Deze fluxgate stroomsensor ziet er uit zoals een normale stroomtrafo. Hij heeft een lineariteit die beter is dan 2 ppm, een meetfout van maximaal 102 ppm, een bandbreedte tot 2 MHz en heeft een maximaal bereik van 50 A tot 200 A, afhankelijk van het cijfercode die de xxx in de typecode vervangt. De gatdiameter voor de doorvoer van de stroomvoerende geleider bedraagt 20,7 mm. De elektronica wordt gevoed door een externe spanning van 15 V_{dc}, die met ongeveer 40 mA wordt belast. Met een 9-pens DSUB-connector worden alle signalen in- en uitgevoerd. Er hangt wel een schattig prijskaartje aan vast: € 557,00 ex. BTW!

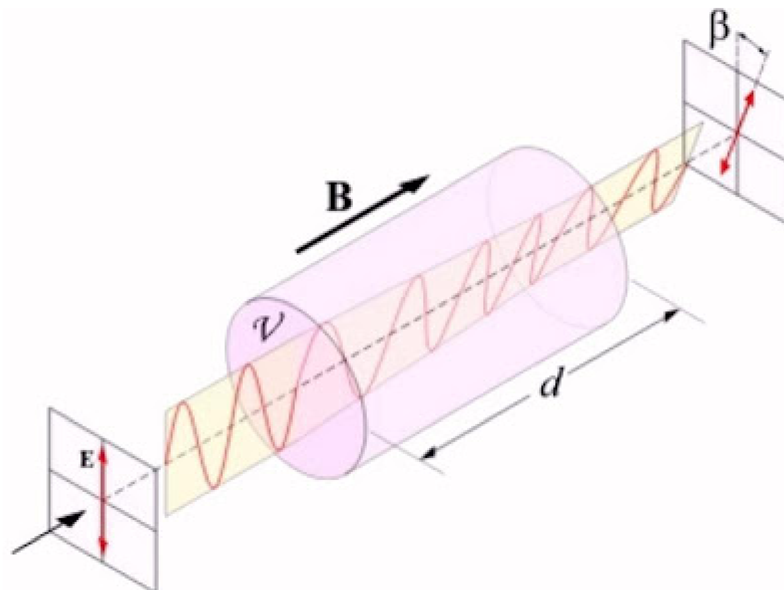


De fluxgate stroomsensor DT50ID van DaniSense.
(© DaniSense)

Gebruik maken van een Faraday stroomsensor

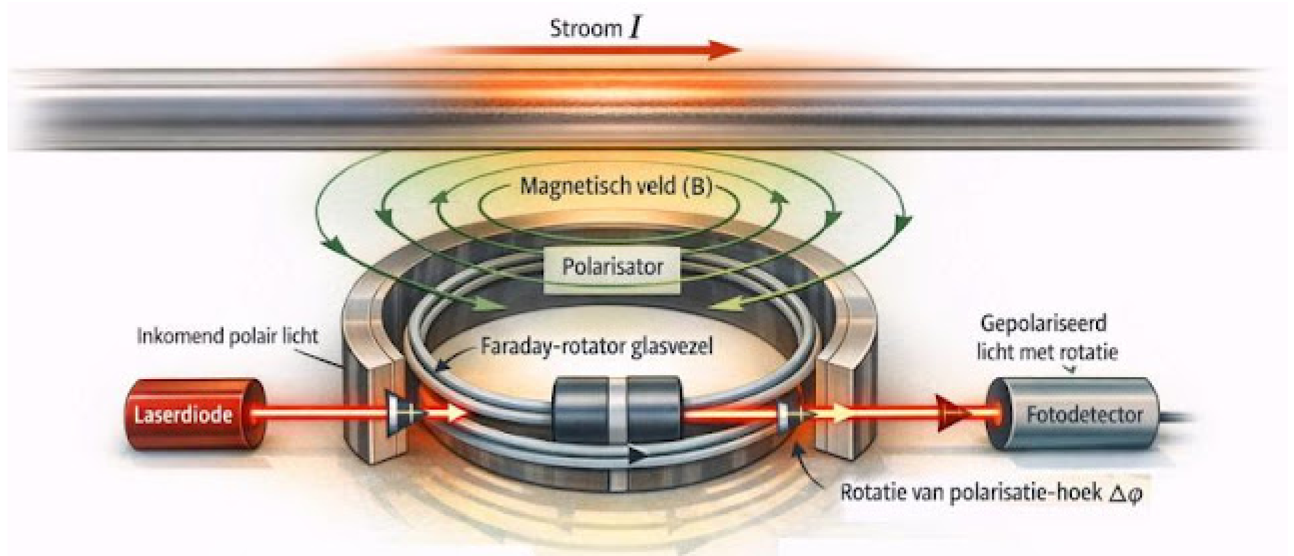
Toepassingsgebied
Een optische stroommeting met gebruikmaking van het Faraday-effect meet een elektrische stroom indirect via het magnetisch veld dat door die stroom wordt opgewekt. De methode is volledig galvanisch gescheiden en bijzonder geschikt voor zeer hoge stromen. De methode is geschikt voor DC en AC.

Het werkingsprincipe
Het optische Faraday-effect is een natuurkundig verschijnsel waarbij het polarisatievlak van een lichtstraal draait wanneer deze door een transparant medium gaat dat zich in een magnetisch veld bevindt. De rotatiehoek is afhankelijk van een aantal fysische en materiaaltechnische constanten, maar ook recht evenredig met de magnetische fluxdichtheid B. De magnetische fluxdichtheid rond een stroomvoerende geleider is weer recht evenredig van de waarde van de elektrische stroom I die door een geleider vloeit. Combineert u deze twee wetmatigheden, dan kunt u besluiten dat de rotatiehoek van het polarisatievlak recht evenredig is met de stroom.
Let er op dat dit effect uitsluitend optreedt als de veldlijnen van de magnetische flux B evenwijdig lopen aan de voortplantingsrichting van het licht.
Een en ander is voorgesteld in de onderstaande figuur. De rotatiehoek van het polarisatievlak wordt hier voorgesteld door de hoek β.



Voorstelling van de werking van het Faraday effect. (© fiberoptics4sale)

De samenstelling van een Faraday stroomsensor
Een typische sensor bestaat uit een lichtbron, bijvoorbeeld een laserdiode of LED. Daarna volgt een polarisator, die het licht lineair polariseert. Het licht valt in in een optisch medium, bijvoorbeeld een glasvezel. Deze glasvezel wordt geplaatst rondom of langs de stroomvoerende geleider, zodat de magnetische flux rond de stroomvoerende geleider parallel loop aan de glasvezel. Nadien volgt een tweede polarisator die de polarisatierotatie omzet in een intensiteitsverandering. Deze verandering wordt gedetecteerd door een fotodetector met bijbehorende elektronica. De schakeling berekent de waarde van de stroom uit het gemeten signaal.



De meetopstelling van een Faraday stroomsensor. (© 2025 ChatGPT)

Eigenschappen van de Faraday stroomsensor

Het grote voordeel van deze sensor ten opzichte van Rogowski spoelen en CT's is dat u er zowel gelijk- als wisselstromen mee kunt meten. Omdat er geen sprake kan zijn van magnetische verzadiging van een kern kunt u er enorm hoge stromen mee meten, tot meer dan 100 kA, waarbij de lineariteit uitstekend blijft over het gehele meetbereik. Vanwege het ontbreken van een kern is de opstelling bovendien volledig ongevoelig voor EMI-storingen. Het nadeel van het systeem is dat bepaalde materiaalconstanten die de omzetting van stroom in rotatie beïnvloeden een vrij hoge temperatuurscoëfficiënt hebben. Een tweede nadeel is dat de opstelling nogal complex is en vrij uitgebreide elektronica vereist.